

## 초음파 합성법을 이용한 이리듐계 인광 물질 합성과 합성된 인광 물질의 전계 발광 특성 분석

유홍정 · 정원근 · 전병희 · 김성현<sup>†</sup>

고려대학교 화공생명공학과 청정에너지 소재 연구실  
136-701 서울시 성북구 안암동 5가  
(2010년 10월 6일 접수, 2011년 1월 4일 채택)

### Study on Electroluminescence of the Phosphorescent Iridium(III) Complex Prepared by Ultrasonic Wave

Hong Jeong Yu, Wonkeun Chung, Byung-hee Chun and Sung Hyun Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 5-ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea  
(Received 6 October 2010; accepted 4 January 2011)

#### 요 약

본 연구를 통해 최근 개발된 근자외선영역대에서 발광하는 이리듐 착물인 Ir(pmb)<sub>3</sub> (Iridium(III) Tris(1-phenyl-3-methylbenzimidazolin-2-ylidene-C,C<sup>2'</sup>))의 합성 과정에서 기존의 합성법과 동일한 발광 특성을 가지면서 더 효율적인 합성 방법을 제안하였다. 합성 과정에서 초음파가 투입되면서 용매에 녹지 않는 반응물의 파쇄 및 혼합을 돕고, 촉매의 활성을 향상시켜 이온 및 라디칼을 형성시키는 방법으로 최대 42.5% 합성 수율을 얻어 내었으며 이는 기존 방법 대비 약 4배 이상 향상된 결과이다. 이러한 초음파 합성법으로 합성된 Ir(pmb)<sub>3</sub>은 이성질체 별로 405 nm(면이성질체) 412 nm(자오선이성질체)의 발광 피크를 보였으며 이중 좀더 효율이 높은 자오선이성질체를 사용하여 전계 발광 소자를 제작하였다. 밴드갭이 큰 Ir(pmb)<sub>3</sub>에 적합한 호스트 물질을 UGH2, CBP, mCP 세가지 선정하여 전계 발광 소자를 제작하였으며, 그 중 mCP를 호스트 물질로 사용한 소자의 경우가 호스트 물질과 인광 물질사이의 에너지 전달이 가장 효율적으로 일어나 가장 높은 휘도와 효율을 보였다.

**Abstract** – Ir(pmb)<sub>3</sub> (Iridium(III)Tri(1-phenyl-3-methylbenzimidazolin-2-ylidene-C,C<sup>2'</sup>)) was synthesized to develop a deep blue-emitting Ir(III) complex. We suggested the ultrasonic reactor to enhance the poor reaction yield of Ir(pmb)<sub>3</sub>. The ultrasonic wave enhanced the reaction yield of Ir(pmb)<sub>3</sub> because the ultrasound helped non-soluble reactants disperse efficiently and produced free radical during the reaction. The maximum yield of Ir(pmb)<sub>3</sub> was 42.5%, which was 4 times higher than conventional method. Organic light emitting devices were fabricated with the synthesized *mer*-Ir(pmb)<sub>3</sub> which emitted at 405 nm. A range of host materials with large bandgaps (UGH2, mCP and CBP) were tested for developing a deep blue emitting device. In case of the device with mCP as the host material, it emitted deep blue and performed quite well relative to the other host materials tested.

Key words: Organic Light Emitting Diode, Phosphorescent Material, Iridium(III) Complex, Ultrasonic, Preparation

#### 1. 서 론

일반적으로 분자가 일중항 여기상태(singlet excitation state)에서 바닥상태(ground state)로 떨어질 때 빛을 방출하는 것을 형광(fluorescence)이라고 하고, 삼중항 여기상태(triplet excitation state)에서 바닥상태로 떨어질 때 빛을 방출하는 것을 인광(phosphorescence)이라고 한다. 이때 최대 발광 효율이 형광의 경우 25%이고, 인광의 경우는 75%로 인광을 이용한 발광이 이론적으로 더 높은 효율을 갖

는다. 유기 전계 발광소자(OLEDs)의 경우, 내부 양자효율(internal quantum efficiency)을 외부 전극으로부터 주입된 전하수 대비 발광 소자 내부에서 발생한 광자(photon) 수의 비율로 나타내며, 이러한 양자효율을 향상함으로써 유기 전계 발광 소자의 수명을 증가시킬 수 있다[1]. 이러한 이유로 이론적으로 더 높은 발광효율을 갖는 인광물질을 유기 발광 소자의 발광층에 도입하여 소자의 발광 효율 및 수명을 향상시키는 연구가 활발히 진행되어왔다[2].

이러한 인광물질들은 공통적으로 이리듐 또는 백금에 유기리간드를 갖는 금속 착물의 구조를 갖는데 대표적인 청색 인광재료로 FIrpic(Iridium(III)bis[2-(2',4'-difluorophenyl)-pyridinato-N,C<sup>2'</sup>]picolate)[3]과 불소화된 ppy 리간드 구조를 기본으로 하는 이리듐

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kimsh@korea.ac.kr

<sup>‡</sup>이 논문은 고려대학교 홍석인 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

착물[4]이 개발되었다. 그러나 이러한 ppy 리간드를 갖는 FIrpic의 경우 발광색이 스카이블루(sky blue) 영역이고 특히 숄더피크(shoulder peak)가 매우 커서 색순도의 y값이 커지는 단점 등을 보이는 경향이 있다.

최근 Forrest 그룹에서 근자외선영역대에서 발광하는 새로운 이리듐 착물인 Ir(pmb)<sub>3</sub> (Iridium(III) Tris(1-phenyl-3-methylbenzimidazolin-2-ylidene-C,C<sup>2'</sup>))을 합성하였다[5]. 이 이리듐 착물은 입체 이성질체를 갖게되는데 이성질체(facial, meridional isomer)마다 그 발광 파장 및 세기가 다르게 나타나며 그 합성 수율이 특히 낮은 것으로 발표되었다. 본 연구에서는 앞서 언급한 Ir(pmb)<sub>3</sub>를 더 효율적으로 합성할 수 있는 방법을 제안하고 합성된 청색 인광물질의 광 발광 특성을 확인하였다. 또한 이를 이용하여 Ir(pmb)<sub>3</sub>의 근자외선 발광에 최적화된 소자를 제작하기 위해 다양한 호스트 물질을 선정하여 기존 문헌상에 제안된 소자보다 더 효율적인 전계발광소자를 제작, 그 소자의 전기발광 특성에 대해 알아보았다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 장치

초음파를 이용한 이리듐 인광 물질 합성 반응기의 도면이 Fig. 1에 나타나있다. 본 반응기는 스테인리스 스틸로 제작되었으며 반응기의 전체 부피는 100 ml이고, 초음파 프로브 부분이 반응기 상단부와 연결되어 반응기 내부의 반응물에 직접 초음파를 전달할 수 있도록 초음파 장비를 위치시켰다. 이때 반응기는 밀폐되어 외부 공기 및 수분과의 접촉을 차단하였으며 최대 10 bar의 압력을 견딜 수 있도록 제작되었다. 20 kHz의 초음파를 발생하는 750 W급 초음파 장비(Cole-Parmer사, 미국)가 실험에 사용되었다.

### 2-2. 합성 방법

Ir(pmb)<sub>3</sub> 합성은 기존에 발표된 합성 방법을 참고하였다[5]. 합성은 총 2단계로 이루어지며, 각 단계별 합성 경로 및 조건은 Fig. 2에 자세히 나타나 있으며, 동일한 조건에서 기존의 합성 방법[5]과 본 연구에서 제안된 초음파 합성방법으로 반복되어 진행되었다.

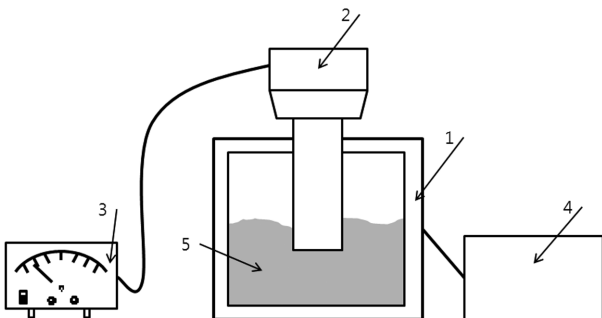


Fig. 1. Diagram of the reactor assisted by ultrasound: (1) stainless steel reactor; (2) ultrasound probe; (3) ultrasound generator; (4) thermostatic bath; (5) reactants mixture.

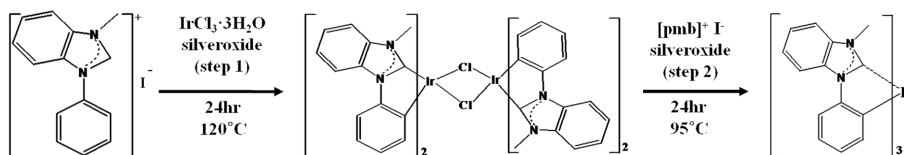


Fig. 2. Mechanism of Ir(pmb)<sub>3</sub> synthesis.

### 2-2-1. [(pmb)<sub>2</sub>IrCl]<sub>2</sub> 다이머 합성

100 ml 반응기에 silver(I) oxide(5.590 g, 24.1 mmol), 1-phenyl-3-methylbenzimidazolium iodide(6.756 g, 20.1 mmol), iridium trichloride hydrate(1.50 g, 5.02 mmol)를 2-ethoxyethanol 50 ml에 녹였다. 반응물은 120 °C로 24시간, 질소분위기에서 외부 빛을 차단시키면서 반응시켰다. 결과물을 상온으로 식히고 감압 증류시킨 다음 플래쉬 컬럼 크로마토 그래피로 silver salt를 제거하고 에탄올을 첨가하여 노란색의 침전물을 얻었다. 침전물을 걸러내고 에탄올로 씻어 진공 오븐에서 3시간 정도 건조하여 화합물을 얻었다.

### 2-2-2. Iridium(III) Tris(1-phenyl-3-methylbenzimidazolin-2-ylidene-C,C<sup>2'</sup>), Ir(pmb)<sub>3</sub> 합성

100 mL 반응기에 silver(I) oxide(0.0886 g, 0.382 mmol), 1-phenyl-3-methylbenzimidazolium iodide(0.225 g, 0.669 mmol), [(pmb)<sub>2</sub>IrCl]<sub>2</sub> (0.412 g, 0.319 mmol)를 1,2-dichloroethane 50 ml에 녹였다. 반응물을 95 °C로 24시간, 질소분위기에서 외부 빛을 차단시키면서 반응시켰다. 결과물을 상온으로 식히고 감압 증류시킨 다음 플래쉬 컬럼 크로마토 그래피로 silver salt를 제거하고 걸러내면 흰색 결과물을 얻었다. 이 결과물에는 자오선이성질체(meridional isomer) 또는 면 이성질체(facial isomer)가 3:1 비율로 섞여 있음을 HPLC 분석으로 확인하였다. 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 각각의 이성질체를 분리하였다.

### 2-3. 합성 수율 분석

결과물 수율은 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 측정되었다. 이때 C18 컬럼(5 μm)을 사용하고 용리액(eluent)을 에세토나이트릴(90%)와 증류수(10%) 혼합액을 사용하여 유속을 0.5 ml/min로 고정하였다. HPLC는 UV 검출기(탐지 파장: 254 nm)가 달린 Agilent사 제품을 사용하였다.

### 2-4. 소자제작

전계발광소자를 진공 증착장비를 사용하여 제작하였으며 제작된 전계발광 소자들의 구조 및 도면은 Fig. 3에 자세히 나타나 있다. 제작된 전계발광소자에는 진공 수송층으로 30 nm 두께의 4-4-bis N-1-naphthyl-N-phenyl-aminobiphenyl(NPD)와 전자저지층으로 10 nm 두께의 4,4,4-tris carbazol-9-yl-triphenylamine(TCTA)를 사용하였다. 그 위에 25-nm 두께의 발광층을 본연구에서 합성한 Ir(pmb)<sub>3</sub> 이성질체 중 자오선이성질체를 선택하고 호스트 물질로 1,4-bis(triphenylsilyl)benzene(UGH2)[5,6], 1,3-bis(carbazol-9-yl)benzene(mCP)[7], 4,4'-Bis-(carbazol-9-yl)biphenyl(CBP)[8,9]를 각각 증착하여 제작하였다. 마지막으로 전자수송층으로 35 nm 두께의 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline(BCP) 사용하고 양극으로 0.8 nm 두께의 LiF와 120 nm 두께의 알루미늄으로 증착하였다. 이성질체 중 자오선이성질체를 소자제작에 선택한 이유는 대부분의 발광 물질의 경우, 자오선이성질체가 면이성질체보다 더 높은 전계발광 효율을 갖고 있기 때문이다[10].

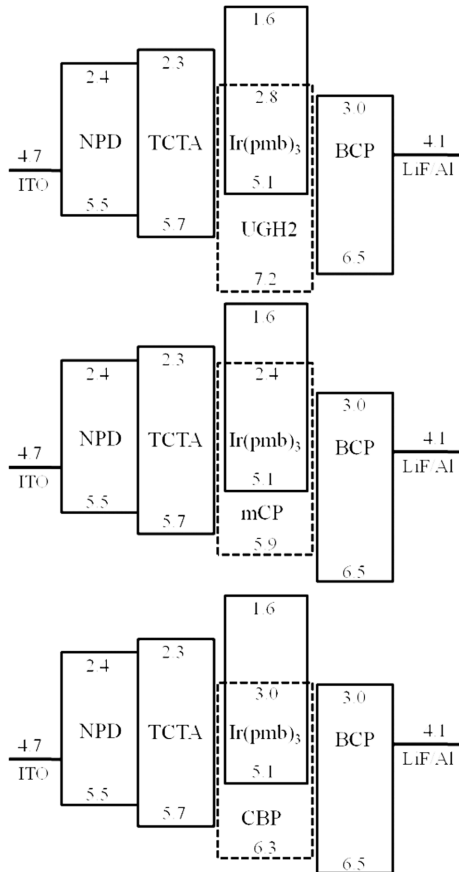


Fig. 3. Design of the EL device.

### 3. 결과 및 토론

#### 3-1. 수율에서의 초음파 영향

Tabel 1은 각 반응 단계에서 기존 합성 방법과 본 연구에서 제안한 초음파 합성법을 이용하였을때의 합성 수율을 보여준다. 초음파를 사용한 실험 결과가 기존 단순 교반을 통한 실험결과[5]와 비교하여 반응 시간과 수율 측면에서 향상됨을 볼 수가 있다. 특히 [(pmb)<sub>2</sub>IrCl]<sub>2</sub> 다이머합성 실험 (1)의 경우 기존 합성방법을 이용하게 되면 이리듐과 리간드의 탄소원자 간의 결합력(Ir(C<sup>^</sup>C))이 낮기 때문에 기존의 대부분 이리듐 착물의 결합인 이리듐과 질소원자 간의 결합(Ir(C<sup>^</sup>N))반응 대비 낮은 수율을 보인다[5]. 이러한 낮은 수율의 반응을 초음파를 이용하면서 결합을 용이하게 하고 반응 효율을 향상시켜 수율의 향상을 얻었다. 이와 같이 초음파 합성법이 기존 합성법[5] 대비 합성 수율을 향상시킨 원인 중 하나는 초음파가 반응물을 더 작은 크기로 파쇄하고 반응물 간의 혼합을 용이하게 하였기 때문이다. 실제 반응물로 사용되는 IrCl<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O 나 [(pmb)<sub>2</sub>IrCl]<sub>2</sub> 다이머의 경우는 용매에 전혀 용해되지 않은 채 반응이 진행되기 때문에 이러한 초음파의 파쇄기능이 더 효과적으로 작용하였다[11]. 또 다른 원인은 초음파가 본 반응에 촉매로 사용된 은화합물(silver(I) salt)의 활성을 향상시켜주는 역할을 한다는 점이다. 이때 은화합물은 이미다졸 리간드의 수소 이온을 제거하면서 이리듐과의 결합을 도와주는 촉매로 촉매의 활성에 따라 전체 반응 속도 및 수율이 영향을 받는다[12]. 은화합물이 초음파에 의해 은 이온이나 라디칼(radical)을 형성하여 반응에 참여하기 용이한 형태로 변형되었기 때문에 초음파 합성법에서 더 높은 수율을 얻어 내었다.

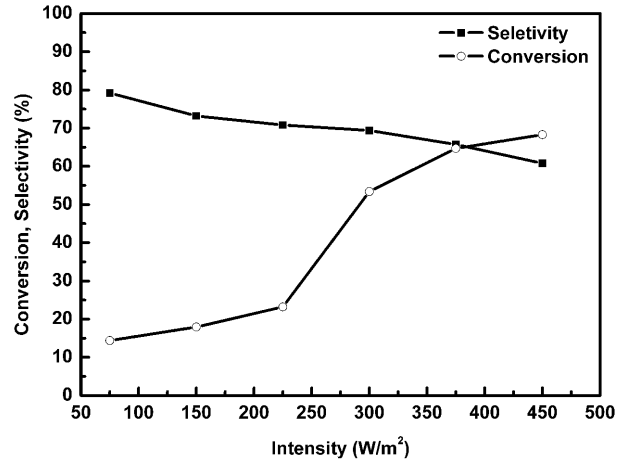


Fig. 4. Relationship between the ultrasound intensity and conversion or selectivity(temperature: 120 °C, reaction time: 24 hr).

또한 수율을 전환율(conversion)과 선택도(selectivity)로 구분하여 초음파의 세기(75~450 W/m<sup>2</sup>)에 따른 전환율과 선택도의 영향을 살펴보고 그 결과가 Fig. 4에 나타나있다. 초음파 세기가 증가함에 따라 225 W/m<sup>2</sup> 이상의 세기에서 전환율을 급격히 증가하는 반면에 선택도는 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 초음파 세기에 따른 전환율 및 선택도의 변화가 앞서 언급한 수율 향상의 원인 중 촉매인 은화합물의 이온화 및 라디칼화 반응이 225 W/m<sup>2</sup> 이상의 초음파에너지에서 진행되기 때문이다.

#### 3-2. Ir(pmb)<sub>3</sub> 광학 특성 및 전계 발광특성

두 가지 이성질체를 갖는 Ir(pmb)<sub>3</sub>는 각 이성질체 별로 다른 발광 특성을 보이는데 이러한 광발광(Photoluminescence) 특성은 Fig. 5에 나타나있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 면이성질체의 경우가 좀 더 단파장인 근자외선 파장(405 nm)의 빛을 발광하며 자오선이성질체의 경우는 그에 비해 장 파장(412 nm) 영역대의 빛을 발광한다. 이러한 발광 특성은 기존 문헌[5]에 언급된 바와 일치 하며 이로부터 기존 합성법과 초음파 합성법으로 합성된 결과물에 광 특성 변화가 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

인광구조의 전계발광소자를 제작하는 데에서 Ir(pmb)<sub>3</sub> 물질의 밴드갭 차체가 크고 LUMO 레벨이 높기 때문에 적절한 호스트물질

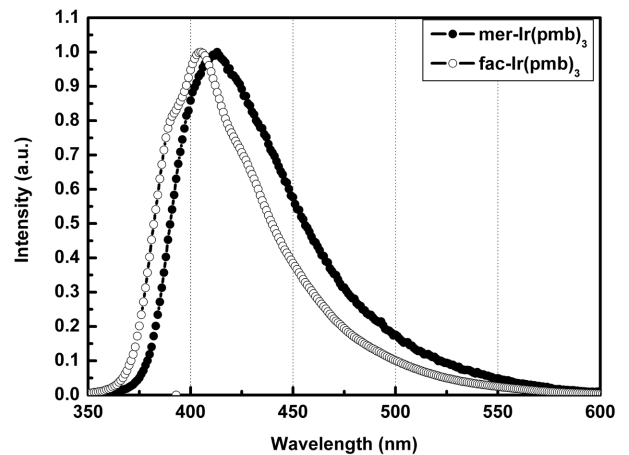


Fig. 5. Room temperature solution PL spectra for fac- and mer- Ir(pmb)<sub>3</sub> synthesized under ultrasound conditions in CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>.

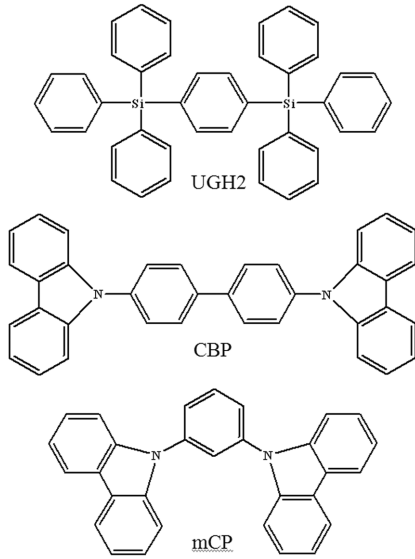
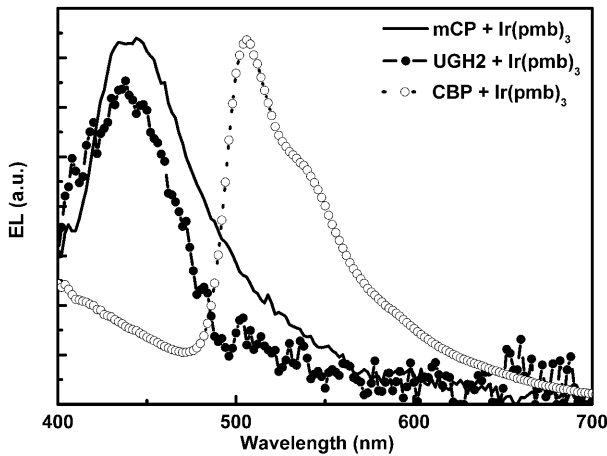


Fig. 6. Molecular structures of host materials.

Fig. 7. Electroluminescence spectra of the following OLED structure: ITO(200 nm)/NPD(30 nm)/TCTA (10 nm)/UGH2 or mCP or CBP +10 wt%: *mer*-Ir(pmb)<sub>3</sub> (30 nm)/BCP(30 nm)/LiF(0.8 nm)/Al (120 nm).

의 선정이 힘들다. 이때 밴드갭 크기만으로 볼 때 Ir(pmb)<sub>3</sub>의 밴드갭 크기 이상의 밴드갭을 갖는 물질인 UGH2와 CBP, mCP를 선정하고 전자저지층 물질을 Ir(pmb)<sub>3</sub>의 HOMO 레벨에 맞추어 TCTA를 선정하였다. Fig. 6은 소자제작에 사용된 호스트 물질의 화학 구조식이다. Fig. 7은 각 호스트물질에 따른 발광 특성의 변화를 보여준다. 비교적 큰 밴드갭을 갖는 UGH2와 mCP의 경우는 호스트에서 인광물질인 Ir(pmb)<sub>3</sub>로의 에너지 전달이 일어나서 Ir(pmb)<sub>3</sub>의 발광( $\lambda_{\max}$ =438 nm)을 보이는데 이는 앞서 확인한 광발광특성으로부터 예측된 결과이다. 반면 CBP의 경우가 UGH2와 비교해 밴드갭 크기가 충분히 크지 않기 때문에 호스트 물질인 CBP에서 Ir(pmb)<sub>3</sub>로의 에너지 전달이 일어나기보다 전자수송층 물질인 BCP와의 들뜬 복합체(exciplex)에 의한 발광이 더 지배적이라 400 nm보다 500 nm 파장의 발광 피크가 더 크게 나타나는 것으로 보인다.

각 제작된 소자의 전기발광 특성이 Table 2에 정리되어있다. 전기적 특성을 살펴 보았을 때 CBP를 사용한 소자의 경우 턴온 전압(turn on voltage)이 약 5.5 V, mCP의 경우 약 6 V을 보여 기존 문헌[5]의 UGH2(약 9 V)와 비교했을때 상대적으로 낮았고, 발광 세기

Table 2. Key parameters of ITO(200 nm)/NPD(30 nm)/TCTA(10 nm)/UGH2 or mCP or CBP + 10 wt%: *mer*-Ir(pmb)<sub>3</sub> (30 nm)/BCP (30 nm)/LiF(0.8 nm)/Al(120 nm) devices

	UGH2	mCP	CBP
Turn on(V)	9	6	5.5
Maximum Luminance(cd/m <sup>2</sup> )	115.9(17V)	3295(13.5V)	1966(14V)
Maximum luminous efficiency(cd/A)	1.86	3.28	2.04
CIE coordinate(1931)	(x)	0.1837	0.185
	(y)	0.1192	0.138

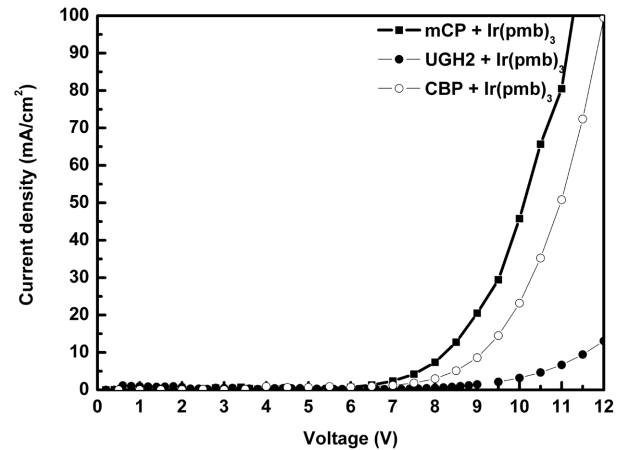


Fig. 8. Comparative plot of voltage vs. current density of devices that used UGH2, mCP and CBP as host materials.

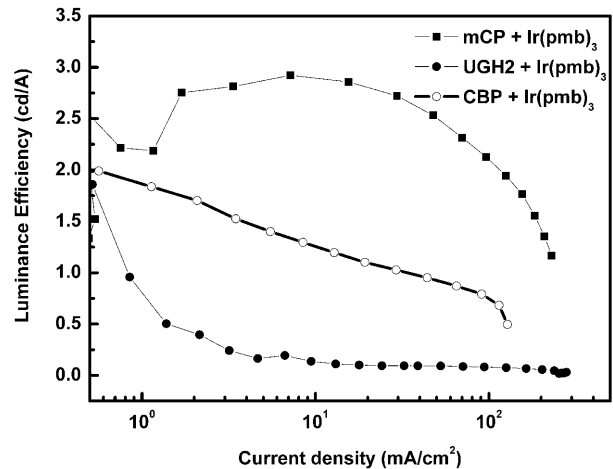


Fig. 9. Comparative plot of luminescent efficiency vs. current density of devices that used UGH2, mCP and CBP as host materials.

역시 약 1,950 cd/m<sup>2</sup>(CBP), 2,300 cd/m<sup>2</sup>(mCP)으로 UGH2(200 cd/m<sup>2</sup>)보다 20배 정도 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 세가지 호스트 물질 중 밴드갭이 가장 큰 UGH2의 경우가 에너지 전달이 더 잘 일어나 Ir(pmb)<sub>3</sub>에서의 발광(400 nm)을 볼 수 있지만 에너지 전달이 용이 하지 않아 낮은 발광 효율 및 전계소자 특성을 보이는 반면, 밴드갭이 작은 CBP의 경우에는 Ir(pmb)<sub>3</sub>로의 에너지 전달이 일어나기 힘들어 인광물질의 발광은 보이지 않지만 전자 및 정공의 이동이 발광층 외부로 이어져 전기적 흐름은 상대적으로 좋은 것으로 파악된다. 마지막으로 mCP를 호스트 물질로 사용하였을 시 UGH2보다 작은 밴드갭을 갖지만 스펙트럼을 통해 Ir(pmb)<sub>3</sub>에 의한 발광이 확인되고 그 발광 휘도 또한 높기 때문에 UGH2보다 mCP의 경

우가 호스트 물질에서 Ir(pmb)<sub>3</sub>의 에너지 전달이 더 효율적으로 일어났다(Fig. 8).

소자의 전류 특성과 일치하게 전기 발광 효율 역시 mCP, CBP, UGH2 순으로 각각 3.3cd/A(9V), 2.04cd/A(8V), 1.86cd/A(8V)으로 상대적으로 낮은 수치를 보였다(Fig. 9).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 새로운 청색 인광물질로 연구되었던 Ir(pmb)<sub>3</sub>을 합성하기위해 기존의 합성법과 동일한 발광 특성을 가지면서 더 효율적인 초음파를 이용한 합성 방법을 제안하였다. 합성 과정에서 초음파가 투입되면서 용매에 녹지 않는 반응물의 파쇄 및 혼합을 돕고, 은 촉매의 활성을 향상시켜 이온 및 라디칼을 형성시켜 더 높은 합성 수율을 얻어낼 수 있었다. 이러한 초음파 합성법으로 합성된 Ir(pmb)<sub>3</sub>은 이성질체 별로 405 nm(면이성질체) 412 nm(자오선이성질체)의 발광 피크를 보였으며 이중 중첩 효율이 높은 자오선 이성질체를 사용하여 다음과 같은 구조를 갖는 전계 발광 소자를 제작하였다 (ITO(200 nm)/NPD(30 nm)/TCTA(10 nm)/ 호스트물질 + 10 wt%:mer-Ir(pmb)<sub>3</sub>(30 nm)/BCP(30 nm)/LiF(0.8 nm)/Al(120 nm)). 밴드갭이 큰 Ir(pmb)<sub>3</sub>에 적합한 호스트 물질을 UGH2, CBP, mCP 세가지 선정하여 전계발광소자를 제작하였을시 mCP를 호스트 물질로 사용한 소자의 경우가 호스트물질과 인광물질사이의 에너지전달이 가장 효율적으로 일어나 가장 높은 휘도와 효율을 보였다.

#### 감 사

이 연구는 교육과학기술부 지원으로 수행하는 21 세기 프론티어 사업(이산화탄소저감 및 처리개발기술)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Burrows, P. E., Gu, G., Bulovic, V., Shen, Z., Forrest, S. R. and Thompson, M. E., "Achieving Full-color Organic Light-emitting Devices for Lightweight, Flat-panel Displays," *IEEE T. Electron Dev.*, **44**, 1188-1203(1997).
- Tamayo, A. B., Alleyne, B. D., Djurovich, P. I., Lamansky, S., Tsyba, I., Ho, N.N., Bau, R. and Thompson, M. E., "Synthesis and Characterization of Facial and Meridional Tris-cyclometalated Iridium(III) Complexes," *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 7377-7387 (2003).
- Baldo, M. A., Thompson, M. E. and Forrest, S. R., "High-efficiency Fluorescent Organic Light-emitting Devices Using a Phosphorescent Sensitizer," *Nature*, **403**, 750-753(2000).
- Yu, H. J., Park, K. and Kim, S. H., "Preparation of Blue-emitting Phosphorescent Iridium(III) Complex under Ultrasound Reaction," *Mol. Cryst. Liquid Cryst.*, **499**, 26-37(2009).
- Sajoto, T., Djurovich, P. I., Tamayo, A., Yousufuddin, M., Bau, R., Thompson, M. E., Holmes, R. J. and Forrest, S. R., "Blue and Near-UV Phosphorescence from Iridium Complexes with Cyclo-metalated Pyrazolyl or N-Heterocyclic Carbene Ligands," *Inorg. Chem.*, **44**, 7992-8003(2005).
- Seo, J. H., Kim, I. J., Kim, Y. K. and Kim, Y. S., "Single Dopant White Electrophosphorescent Light Emitting Diodes Using Heteroleptic Tris-cyclometalated Iridium(III) Complexes," *Thin Solid Films*, **516**, 3614-3617(2008).
- Yook, K. S., Jeon, S. O., Joo, C. W. and Lee, J. Y., "High Efficiency Deep Blue Phosphorescent Organic Light-emitting Diodes," *Org. Electron.*, **10**, 170-173(2009).
- Yook, K. S. and Lee, J. Y., "Recombination Zone Study of Phosphorescent Organic Light-emitting Diodes with Triplet Mixed Host Emitting Structure," *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 181-184(2010).
- Tsuboi, T. and Aljaroudi, N., "Relaxation Processes in the Triplet State T<sub>1</sub> of Organic Ir-compound Btp<sub>2</sub>Ir(acac) Doped in PC and CBP Fluorescent Materials," *J. Lumines.*, **119-120**, 127-131(2006).
- Holmes, R. J., Forrest, S. R., Sajoto, T., Tamayo, A., Djurovich, P. I., Thompson, M. E., Brooks, J., Tung, Y. J., D'Andrade, B. W., Weaver, M. S., Kwong, R. C. and Brown, J. J., "Saturated Deep Blue Organic Electrophosphorescence Using a Fluorine-free Emitter," *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 243503-243507(2005).
- Ohsaka, T., Isaka, M., Hirano, K. and Ohishi, T., "Effect of Ultrasound Sonication on Electroplating of Iridium," *Ultrason. Sonochem.*, **15**, 283-288(2008).
- Wang, H. M. J. and Lin, I. J. B., "Facile Synthesis of Silver(I)-Carbene Complexes. Useful Carbene Transfer Agents," *Organometallics*, **17**, 972-975(1998).